

Caractérisation expérimentale et étude tribologique des sabots de frein en matériau composite à matrice organique des wagons SNTF

I. BENBRINIS^a, B. REDJEL^b

a. Département Génie Mécanique – Université Badji Mokhtar Annaba, BP 12, Annaba, Algérie.
email :

b. Laboratoire Génie Civil – Université Badji Mokhtar Annaba, BP 12, Annaba, Algérie.
email : bredjel@yahoo.fr

Résumé :

La mesure de la dureté Rockwell d'un matériau composite à matrice organique constituant les sabots de frein de wagon de transport du minerai de la SNTF (Algérie) a permis à partir d'un abaque spécifique de déduire les duretés Brinell (HB) et Vickers (HV). Le comportement ainsi que le mode de rupture en compression ont été étudiés sur des éprouvettes cubiques et cylindriques de dimensions appropriées. Les mesures aboutissent à des valeurs comparables des résistances. La réponse du comportement au frottement ainsi que l'identification des mécanismes physiques du frottement activés au contact sous sollicitations de freinage sévères ont été étudiés à l'aide des essais de freinage réalisés sur un tribomètre de type CSM+. Le coefficient de frottement mesuré rentre dans les valeurs généralement acceptables et tolérés par le fabricant.

Abstract :

Rockwell hardness measurement of a composite material with an organic matrix constituting the transport wagon brake shoes of SNTF (Algeria) enabled from a specific chart to deduct Brinell hardness (HB) and Vickers (HV). The behavior and the compression failure mode were studied on cubic and cylindrical specimens of appropriate size. The measures lead to comparable values of resistors. The answer of the friction behavior and the identification of the physical mechanisms of friction activated contact under severe braking loads were studied using the braking tests on a type of tribometer CSM +. Measured the friction coefficient falls within the generally acceptable values and tolerated by the manufacturer.

Mots clefs : Composite – organique – usure – sabot de frein – dureté – frottement.

1. Introduction

De nombreux matériaux dotés de propriétés tribologiques très intéressantes comme l'amiante ou le cadmium sont de plus en plus interdits à cause principalement de leur toxicité et des risques majeurs qu'ils peuvent causer à l'espèce humaine et à l'environnement. La recherche de solutions de substitution indispensable a permis ainsi à de nouveaux matériaux tels que les céramiques, les composites performants, les matériaux composites avancés ou les frittés de faire leur apparition ces dernières années dans le domaine du contact et de la friction avec des applications dans le domaine du freinage ferroviaire [1-2-3]. Le composite organique de type carbone possédant de bonnes propriétés mécanique et tribologique commence à être très employé dans la fabrication des semelles de frein. Cependant, les phénomènes d'oxydation le dégradent dès que la

température dépasse 500 °C. Des travaux récents soulignent l'importance des propriétés thermiques des composites C/C 2D ou 3D dans leurs performances en simulation de freinage [4]. Ces travaux qui restent peu nombreux se limitent à des études quasi-industrielles ayant surtout pour objectif de tester des matériaux différents dans des conditions se rapprochant de la réalité et de comparer leurs comportements tribologiques notamment de point de vue de la variation du frottement et du taux d'usure. J.D. Chen et al. [5-6] étudiant l'influence de la vapeur d'eau sur une variété de composites montrent que plus l'humidité relative est élevée, plus la transition vers un régime de frottement haut est retardée. Les taux bas d'humidité relative conduisent alors à un taux d'usure et à un frottement plus importants lors de la stabilisation de ce dernier après la transition. L'analyse des travaux concernant le frottement des composites à base organique révèle des similitudes avec ceux concernant les graphites (régimes de frottement bas et haut avec l'existence d'une transition brutale). En général, l'approche adoptée pour l'analyse des mécanismes physiques de frottement et d'usure repose sur le concept de tribologie à trois corps. Ce concept introduit dans les années 70 par M. Godet [7], puis développé par Y. Berthier [8-9] met en jeu un troisième corps formé entre les deux premiers que sont le sabot et la roue. Ce troisième corps qui prend un sens matériau et un sens cinématique constitue avec les deux premiers, accompagnés du mécanisme assurant le frottement, le triplet tribologique qui doit être considéré lors de l'étude de tout phénomène tribologique [10]. Ce travail porte sur l'analyse des sabots de frein en matériaux composites des wagons de transport du minerai de la SNTF (Algérie) dans le but d'identifier leur comportement et de proposer d'éventuelles solutions quand à l'amélioration de leur taux d'usure et de leur durée de vie. Une caractérisation physico mécanique du matériau de base est aussi investiguée afin de mesurer certaines propriétés de base.

2. Matériau constitutif et caractérisation physico mécanique et tribologique

L'objectif de la mesure des caractéristiques physiques est une identification partielle du matériau pour être certain, lors des contrôles de réception ou des vérifications ultérieures, qu'elles sont restées constantes et que le matériau utilisé correspond au matériau homologué de part la nature des matrices et des renforts. Ces caractéristiques fournissent des informations intéressantes pour l'utilisation du matériau.

2.1. Matériau constituant les sabots

Le produit constituant les sabots est un matériau composite constitué d'une matrice organique renforcée par des fibres, elles-mêmes en carbone. La complémentarité et la combinaison des qualités de chacun de ces deux composants devraient conférer au matériau global des performances mécaniques et thermiques intéressantes. Un exemple d'une micrographie de la structure du composite organique est illustré sur la figure 1.

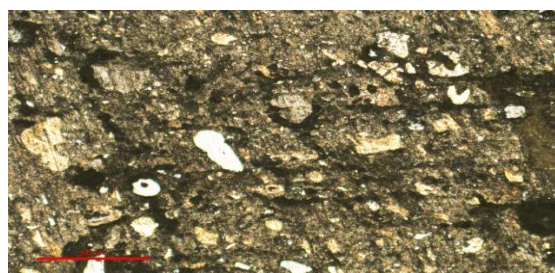


Figure 1 : Exemple de microstructure du composite

Afin de répartir les microdéfauts locaux qui peuvent exister au sein du filament, un nombre important de filaments sont ainsi regroupés au sein de la structure. Ceci permet d'obtenir par la suite un fil de base de

diamètre suffisant pour une manipulation rapide tout en assurant une faible rigidité flexionnelle lors de la mise en forme. Enfin cette action permet aussi d'augmenter la longueur du fil manipulable. Les micrographies des figures 2 et 3 montrent respectivement des vues microscopiques de la structure du matériau composite avant rupture et du filament qui relie la structure après rupture de l'échantillon.

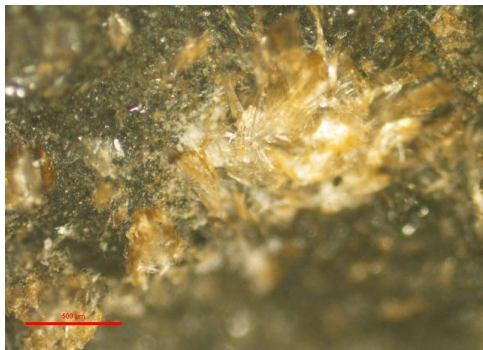


Figure 2 : vue microscopique de la structure composite avant rupture (500 µm)

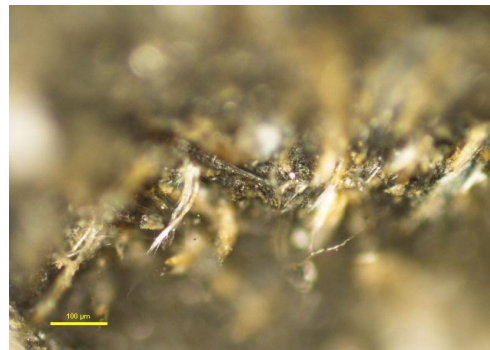


Figure 3 : vue microscopique du filament après la rupture du matériau (100 µm)

2.2. Mesure de la masse volumique

Deux méthodes ont été utilisées pour la mesure de la masse volumique m_v : la méthode classique et la méthode du pendule. Cette dernière consiste à suspendre l'éprouvette au crochet du bassin d'une balance au moyen d'une ficelle mince et son poids dans l'air est déterminé avec une précision de 1 mg. L'éprouvette est ensuite suspendue librement dans de l'eau à une température comprise entre 18 °C et 24 °C, puis pesée une nouvelle fois. Il est à signaler qu'avant la pesée, les bulles d'air adhérant à l'éprouvette sont éliminées, ce qui peut être facilité par la présence de traces de détergent dans l'eau. La masse volumique dans ce cas est donnée par le rapport entre le poids dans l'air et la différence entre le poids dans l'air et celui dans l'eau. Les valeurs mesurées sont par les deux méthodes sont les suivantes:

méthode classique : $m_v = 1,658 \text{ g/cm}^3$

méthode du pendule : $m_v = 1 \text{ g/cm}^3$

Il apparait une divergence assez significative entre les résultats donnés par ces deux méthodes. Le nombre de mesures limité ainsi que la difficulté dans la précision de la méthode du pendule qui reste difficile dans son exécution peuvent être une des causes probables de cet écart important. Il est cependant intéressant de signaler que la valeur mesurée par la première méthode est très proche de l'ordre de grandeur de celle mesurée sur des composites multidirectionnels densifiés par voie liquide (précurseur non précisé) par R. Devi et R. Rao [11] et qui est de $1,8 \text{ g/cm}^3$ ainsi que de celle obtenue par Taylor [12] sur des composites densifiés par différentes voies et qui est de $1,6 \text{ g/cm}^3$.

2.3. Mesure de la dureté Rockwell

Les éprouvettes pour l'essai de dureté Rockwell sont d'abord préparées par découpage d'un échantillon cubique de $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ de la garniture à l'endroit spécifié sur la semelle. Elles subissent par la suite un usinage du dos jusqu'à la disparition de toute la tôle, support et l'obtention d'une surface lisse parallèle à la surface supérieure de freinage. L'essai de dureté Rockwell est effectué conformément au procédé A de la norme ASTM D 785-65. La norme NF EN ISO 6508-1 est aussi utilisée pour ce type d'essai. Il consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de l'éprouvette, un pénétrateur qui est un cône en diamant à un angle de 120° et d'extrémité sphérique de diamètre 0,2 mm et à mesurer l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration par une lecture directe. L'utilisation du cône permet d'éviter une dispersion importante. Ainsi, après la mise en place de l'éprouvette sur l'appareil (figure 4), il est procédé

en moins de 10 secondes à l'application de la charge minimale de 100 N en remettant à zéro la petite aiguille du cadran de l'appareil. La grande aiguille est pour sa part réglée sur (B) 30 sur l'échelle graduée correspondante de l'appareil. Le cône s'enfonce d'une profondeur e_0 .



Figure 4 : Appareil utilisé pour la mesure classique de la dureté

Juste 10 secondes après l'application de la charge minimale et immédiatement après le positionnement du cadran, la charge est accrue à partir de la charge minimale de 100 N jusqu'à la charge maximale de 600 N. La charge maximale est ensuite retirée après 15 secondes et la charge ramenée à la valeur minimale. Le cône remonte et se stabilise à une profondeur e_2 . Ces indices Rockwell peuvent se lire directement sur le cadran gradué. La dureté Rockwell C désigné par HRC est donnée par : $HRC = 500 (100 - (e_2 - e_0))$. Selon les normes, la dureté s'exprime par un nombre sans dimension.

Dix échantillons ont été expérimentés et chaque échantillon subit trois tests. La valeur moyenne est adoptée pour la caractérisation. La norme allemande DIN 50-150 a établi un abaque spécifique permettant de déduire les duretés Brinell (HB) et Vickers (HV) par une conversion à partir de la mesure de la dureté Rockwell. Les résultats obtenus de mesure et des conversions ainsi que l'écart-type et le coefficient de variation relatifs à HRC sont résumés dans le tableau 1. Ces résultats se distinguent par une dispersion malgré toutes les précautions prises lors des manipulations. Cette dispersion dont l'ordre de grandeur est acceptable pour ce type de matériau composite est principalement due à la nature de l'état de surface des échantillons difficile à rendre parfaitement lisse ainsi qu'au caractère hétérogène du matériau.

Tableau 1 : valeurs mesurées et converties des duretés

Dureté	HRC	HV	HB
Moyenne	35,5	350	333
Écart-type	1,85	-	-
Coef. de variation	5,2%	-	-

2.4. Dispositif de compression

Deux types d'éprouvettes ont été utilisés pour la caractérisation en compression du matériau et ont été prélevées dans les semelles et conditionnées immédiatement avant les essais durant trois jours à une température de 23 ± 2 °C et à une humidité relative de 50 ± 5 % : des éprouvettes cubiques de $4 \times 4 \times 4$ cm³ et des éprouvettes cylindriques de 2.5 cm de hauteur et de 2 cm de diamètre conformes aux prescriptions normatives EN 12350-1, EN 12390-1, EN 12390-2 et EN 12504-1. Le diamètre et la hauteur des éprouvettes sont mesurés avec une précision de 10 µm. Les éprouvettes sont centrées sur le plateau inférieur de la

machine de compression avec une précision de 1 % de la dimension nominale pour les éprouvettes cubiques et du diamètre pour les éprouvettes cylindriques. L'essai d'écrasement est mené conformément à la norme ASTM D695 sur une machine de compression de marque Digitec à affichage digital jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette. La vitesse de chargement est constante, appliquée sans choc avec un accroissement de façon continue monotone. La figure 5 montre le dispositif utilisé.



Figure 5 : Dispositif utilisé en compression

2.5. Diagnostic tribologique de freinage

La caractérisation tribologique du matériau composite a été réalisée par un test tribologique utilisant un tribomètre à pion-disque CSM+ doté d'un affichage numérique donnant la présentation des résultats de la variation du coefficient de frottement en fonction des trois paramètres que sont le temps, le déplacement et le nombre de tour (figure 6). La règle de changement d'échelle permettant la représentativité d'essais de freinage sur le tribomètre par rapport aux freinages rencontrés en service est présentée. Le test de tribologie consiste à produire un déplacement relatif entre deux corps sous une charge contrôlée. L'échantillon de forme cylindrique de diamètre 20mm et de hauteur 15mm est mis en contact avec une bille montée sur un bras élastique et subit un déplacement rotatif comme. La faible déflexion du bras permet de déterminer les forces tangentielles et donc le coefficient induit par ce déplacement. Le dispositif est relié à un microordinateur qui permet l'acquisition des résultats. Le test est compatible avec les normes DIN 50324, ASTM G99 et ASTM G133. Le taux d'usure pour l'échantillon est calculé en déterminant la perte de volume par unité de distance parcourue. La figure 6 montre l'ensemble des appareillages constituant le dispositif de l'expérimentation.



Figure 6 : tribomètre utilisé pour la mesure du coefficient d frottement

3. Résultats, analyse et discussions

3.1. Courbe charge-déplacement en compression du matériau

Les figures 7 et 8 présentent un exemple de courbe charge-déplacement obtenues durant l'essai de compression pour les deux types d'éprouvettes testés. Ces courbes présentent la même allure et sont linéaires jusqu'à la rupture totale traduisant le caractère élastique fragile du matériau. Il est à signaler que le prélèvement des cylindres et des cubes ont été effectués dans des endroits différents sur des semelles différentes afin d'avoir une bonne représentativité des mesures.

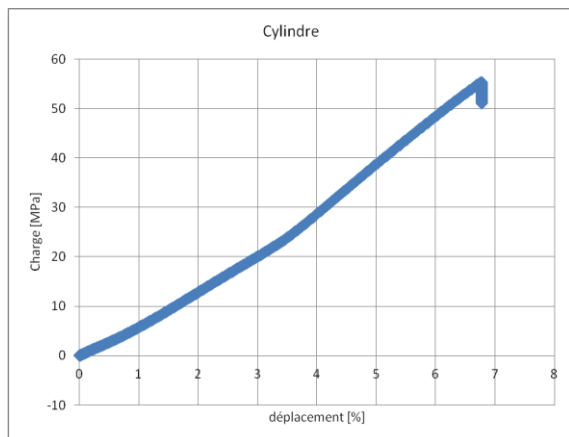


Figure 7 : comportement en compression de l'éprouvette cylindrique

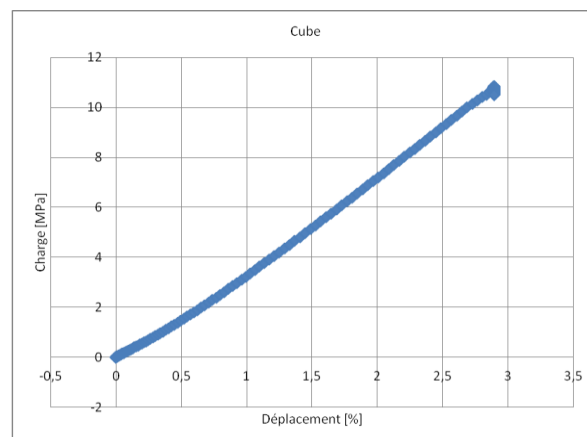


Figure 8 : comportement en compression de l'éprouvette cubique

3.2. Contrainte à la rupture

Le tableau 2 résume les résultats de mesure de la contrainte à la rupture moyenne en compression obtenues sur des éprouvettes cubiques et cylindriques ainsi que les écarts-types calculés.

Tableau 2 : Résistance à la compression

	Nombre	Résistance (MPa)	Ecart type (MPa)	Coef de variation %
Cylindre	10	85	11	13%
Cube	5	86,5	4,8	5,5%

Ces résultats se caractérisent par une dispersion due à l'aspect composite du matériau, à la dispersion de l'essai mécanique lui-même ainsi qu'à l'aspect probabiliste de la rupture pour les deux corps d'éprouvettes. Cependant l'ordre de grandeur de cette dispersion reste acceptable dans la mesure où il est cadré dans la plage de ceux indiqués dans la littérature pour les matériaux à caractère composite granulaire. Il est important de signaler que les éprouvettes ont rarement des caractéristiques comparables car nominalement elles sont non identiques du fait de l'hétérogénéité au niveau de la microstructure ainsi que de la présence de défauts de différentes dimensions et densités aléatoirement distribués au sein du volume de chaque échantillon et qui sont par conséquent à l'origine de la ruine de ces matériaux. Cette dernière peut alors être déclenchée à différents niveaux de contraintes selon l'orientation, la localisation, la dimension et la densité des microporosités, des inclusions, des discontinuités de fabrication et de la faiblesse des interfaces et se propager par la suite de façon instable. Les deux géométries indiquent des valeurs comparables. Le rapport entre la valeur donnée par le cylindre et celle donnée par le cube est en moyenne de 0,98 ce qui est satisfaisant. Il est à noter que pour faire une analogie avec le matériau béton ce rapport sur des éprouvettes 15/30 pour le cylindre et sur des cubes de 20 cm d'arête en béton varie de 0,7 à 0,9 et qu'une moyenne de 0,83 est alors adoptée par le comité européen du béton pour ce matériau [13-14]. Il est à noter que malgré leur nombre important, les éprouvettes cylindriques affichent une dispersion des valeurs de la résistance plus importante que celles montrées par les éprouvettes cubiques. Enfin il faut signaler que les valeurs mesurées de la contrainte à la rupture aussi bien sur le cylindre que sur le cube rentrent dans les plages données par les fiches techniques des

caractéristiques physiques et mécaniques de ce type de matériau composite relevées dans la littérature scientifique et technique.

3.3. Modes de rupture

Des exemples de mode de ruine des éprouvettes cubiques en compression sont illustrés par les figures 9 et 10. La rupture s'effectue selon des plans obliques avec la formation de deux pyramides tronquées et opposées par la petite base. Ce mode de rupture est typique sur les éprouvettes cubiques. C'est un mécanisme analogue à celui observé sur les bétons et les matériaux cimentaires et il est surtout conditionné par les forces de frottement que se développent entre les faces de l'éprouvette et les plateaux de la presse et qui sont dirigées à l'intérieur du cube bloquant de la sorte le développement des déformations transversales [14]. Les figures 9 et 10 montrent respectivement une illustration et une schématisation de ce mécanisme de ruine.



Figure 9 : exemple de rupture du cube

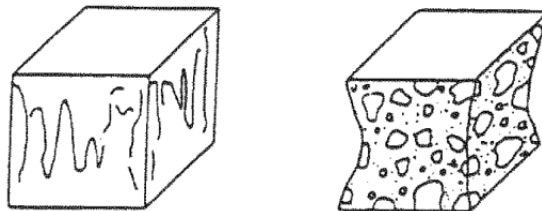


Figure 10 : schématisation du mode de rupture du cube

Le mode de rupture des éprouvettes cylindriques est montré sur les figures 11 et 12. Le mécanisme de ruine se caractérise par l'apparition et la formation de lignes de rupture selon des plans parallèles à la direction de l'effort de compression comme schématisé sur la figure 12. C'est un exemple illustratif d'une rupture correcte du cylindre.



Figure 11 : exemple de rupture du cylindre.

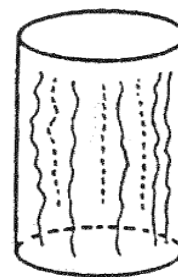


Figure 12 : schématisation du mode de rupture du cylindre.

3.4. Variation du coefficient de frottement

Le suivi du coefficient de frottement et de l'usure est un aspect essentiel dans la compréhension des mécanismes d'endommagement qui se produisent sur des dispositifs industriels comme les sabots de freins.

La figure 13 montre un exemple de la variation du coefficient de frottement en fonction des trois paramètres : temps, déplacement, nombre de tours. Comme illustré, le coefficient de frottement montre une

augmentation rapide au début de l'essai avec le temps pour se stabiliser rapidement à partir de 200 s autour de la valeur de 0,21. Cette valeur est conforme à celle donnée par le fabricant.

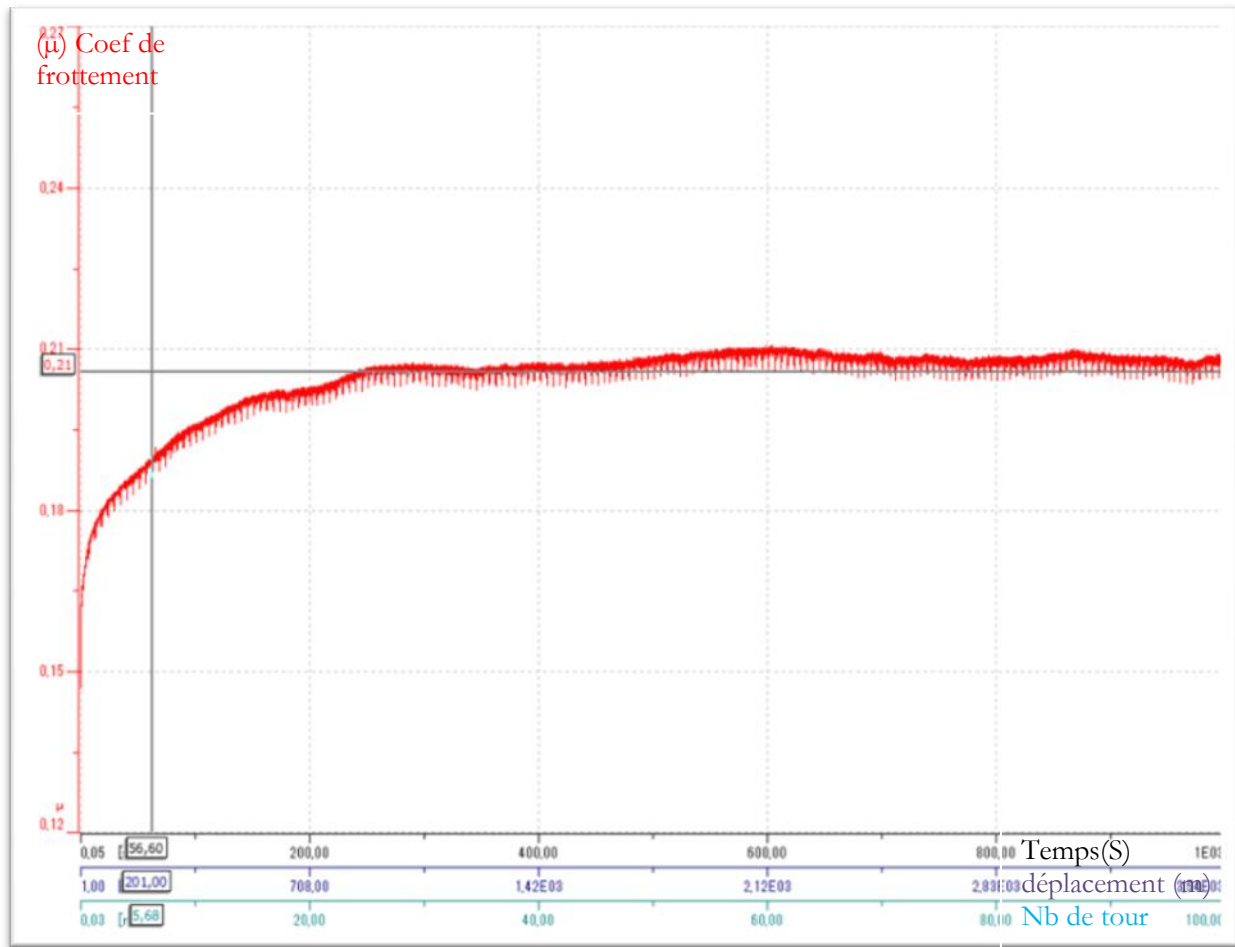


Figure 13 : variation du coefficient de frottement en fonction du temps, du déplacement et du nombre de tours

4. Conclusion

Les mesures des caractéristiques physique et mécanique du composite à matrice organique montrent une dispersion caractéristique de l'aspect composite du matériau. Celle-ci est due principalement à l'aspect hétérogène de ce type de matériau. Les valeurs des résistances mesurées sur des échantillons cubique et cylindrique sont convergentes et rentrent dans les ordres de grandeur de celles rapportées par la littérature scientifique et technique.

La mesure de la dureté Rock-Well a permis d'établir à l'aide d'un abaque donné par la norme allemande DIN 50-150, les duretés Brinell(HB) et Vickers (HV).

Le comportement en compression du composite organique est linéaire jusqu'à la rupture traduisant son caractère fragile.

La valeur du coefficient de frottement mesurée est de l'ordre de 0,21 est conforme à celle préconisée par l'UIC (union international du chemin de fer).

Remerciements

Les auteurs remercient la direction de l'Ecole des Mines et de la Métallurgie de Annaba (Algérie) pour l'aide fournie quand à l'utilisation des appareils et pour l'assistance lors des essais de mesure de la dureté.

Références

- [1] X. Bourrat, Structure in carbons and carbon artefacts, Science of Carbon Materials, H. Marsh and F. Rodriguez-Reinoso, Pub. Universidad de Alicante 1999, pp. 1-97.
- [2] X. Bourrat, A. Oberlin, R. Bachelard, Carbon, 31, 2, 1993, pp. 287-302.
- [3] A. Fillion, Composites C/C et C/C-SiC pour applications tribologiques Thèse de Doctorat de l'Université Bordeaux I n° 2168 2000.
- [4] G. Lu, P. Cui, Q. Wang, Influence of structure of the reinforcement in C/C composite on it's friction and wear behaviour Proc. Conf. Carbon Shanxi Chungin Audio-Visual Press Ed., Beijing, 15-19 Sept. 2002.
- [5] J.D. Chen, J.H. Chern, C.P. Ju Effect of load on tribological behaviour of carbon-carbon composites Journal of Materials Science 31 1996, pp.1221-1229.
- [6] J.D. Chen, J.H. Chern Lin, C.P. Ju, Effect of humidity on the tribological behavior of carbon-carbon composites Wear 193 1996, pp.38-47.
- [7] M. Godet The third body approach, a mechanical view of wear, Wear 100 1984, pp. 437-452.
- [8] Y. Berthier, M. Godets Third body approach Tribology Series 32 1996 pp. 21-30.
- [9] Y. Berthier, Background on friction and wear in Lemaître Handbook of Materials Behavior Models, Academic Press Section 8.2. 2001 pp. 676-699.
- [10] S. Descartes, Y. Berthier, Rheology and flows of solid third body: background and application to an MoS_{1.6} coating, Wear 252, 2002, pp. 546-556.
- [11] G. Rohini Devi, K. Rama Rao, Carbon-carbon composites – an overview Defence Science Journal 43 4 1993 pp. 369-383.
- [12] C. Taylor, Carbon matrix composites in Comprehensive Composite Materials : Ed. A. Kelly, C. Zweben, R. Warren Pergamon Press, 4, 2000, pp. 387-426.
- [13] F. Gorisse, Les essais mécaniques in le béton hydraulique, Presses de l'ENPC Paris 1982 pp. 379-381.
- [14] F. Chellali, B. Redjel, La pratique des essais destructifs : l'essai d'écrasement du béton Algérie – Equipement Revue Technique de l'ENTP N° 41 Mai 2006 pp. 16-20.